

氏 名	吉 田 哲 男		
授 与 学 位	博 士 (工 学)		
学位授与年月日	平成 7 年 3 月 24 日		
学位授与の根拠法規	学位規則第 4 条第 1 項		
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 電気・通信工学専攻		
学 位 論 文 題 目	交差指電極励振型圧電セラミック円柱振動子を用いた 振動ジャイロの研究		
指 導 教 官	東北大学教授 中村 僖良		
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 中村 僖良	東北大学教授 中鉢 憲賢	
	東北大学教授 山之内和彦		

論 文 内 容 要 旨

第 1 章 緒 論

ビデオカメラの手ぶれ補正やカーナビゲーション用の角速度センサとして、圧電振動ジャイロが注目されている。圧電振動ジャイロは、直交する二つの振動モードを利用し、圧電振動子を回転させた時に生ずるコリオリ力の作用による圧電振動子特性の変化から、加わった角速度の大きさを検出する方式の角速度センサである。

圧電振動ジャイロとしては、正方形や正三角形断面の音片振動子や双共振音叉振動子を用いたものが良く知られている。これら、従来の圧電振動ジャイロでは、共振周波数の低い屈曲振動モードが主に利用されるため、振動子はエリンバー等の恒弾性金属材料からなる音片振動子や音叉振動子に圧電素子を接着した構造になっている。しかし、金属振動体に圧電素子を接着した構造では、構造が複雑になる上に、接着により振動ジャイロ特性のばらつきが大きくなり、特に小形の振動ジャイロを構成する場合のネックとなっていた。

本章では、圧電セラミック矩形板に交差指電極を形成し、この電極を分極および駆動電極として利用すると、圧電横効果により効率良く屈曲振動の励振が可能であるという技術を発展させ、図 1 に示す、形状が簡単で加工精度が高く、

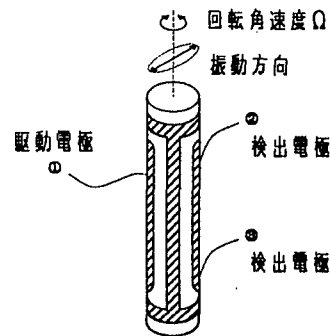


図 1 圧電セラミック円柱屈曲振動子

しかも接着工程が不要で量産に適した交差指電極励振型圧電セラミック円柱振動子を用いた圧電振動ジャイロを提案している。

第2章 振動ジャイロ用交差指電極励振型圧電セラミック円柱屈曲振動子

圧電セラミック円柱の直交する二つの屈曲振動を利用し、円柱の外周面に形成した交差指電極により分極および駆動・検出を行う交差指電極励振型圧電セラミック円柱屈曲振動子を用いた振動ジャイロを提案し、その動作原理を示した。また、小形の振動ジャイロを得るために、直径1mmの圧電セラミック円柱に電極幅0.25mmの交差指電極を形成する曲面スクリーン印刷技術を開発した。図2に曲面スクリーン印刷の原理図を示す。また、振動子特性の分極条件依存性を明らかにするとともに、半円形のシリコンゴムによる振動子の支持と、面実装用の端子を具備した振動子ホルダを用い、図3に示すような、性能と実用性に優れた支持構造を開発した。

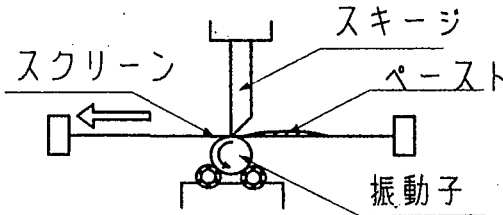


図2 曲面スクリーン印刷原理図

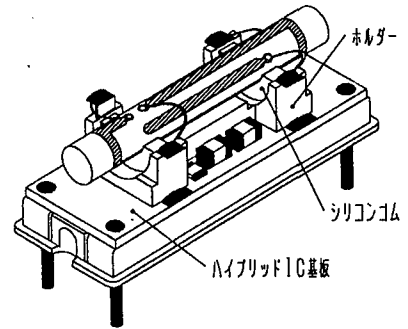


図3 振動ジャイロの支持構造

第3章 圧電セラミック円柱振動子を用いた圧電振動ジャイロの等価回路解析

交差指電極励振型圧電セラミック円柱振動子およびこれを用いた振動ジャイロの解析に適した新しい等価回路として、駆動・検出電極と振動モード軸との為す角度ずれを考慮した等価回路を導出し、振動ジャイロの感度の解析を行ない、実測値と計算値が良く一致することを確認した。

振動モード軸と電極配置の関係を図4に示すように定義した場合、図5の等価回路における力係数 A_{ij} は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} A_{1x} &= \cos(\delta) \\ A_{1y} &= -\sin(\delta) \\ A_{2x} &= \cos(2\alpha + \delta) \\ A_{2y} &= -\sin(2\alpha + \delta) \\ A_{3x} &= \cos(-2\alpha + \delta) \\ A_{3y} &= -\sin(-2\alpha + \delta) \end{aligned}$$

ただし、 α は電極分割角度

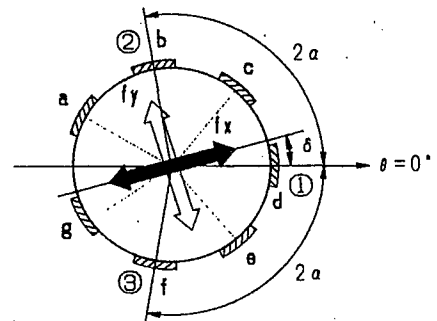


図4 振動モード軸のずれ角 δ と電極配置

また、振動ジャイロを構成する場合に問題となる振動モード軸のずれ角を、各端子から見た入力インピーダンスの周波数特性の実測値と等価回路により計算した特性とを比較することにより推定できることを明らかにした。

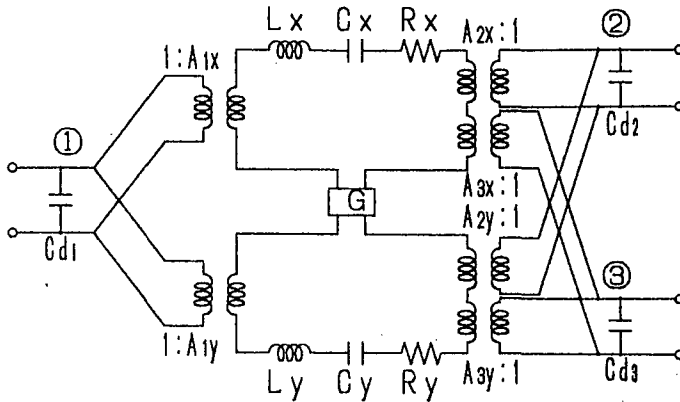


図5 圧電セラミック円柱振動子を用いた振動ジャイロの等価回路

第4章 振動モード軸の変動要因とその制御

本章では、振動ジャイロの静止時の出力電圧のオフセットの原因となる振動モード軸の変動要因について検討し、電極配置の非対称性がその主要因であることを実験的に明らかにした。また、レーザーにより溝を形成して振動モード軸の角度ずれを制御する方法を検討し、これを応用した共振周波数の自動調整法を確立した。また、電極パターンによっても振動モード軸の制御が可能であることを見出し、電極印刷時の寸法ずれの影響の少ない電極パターンとして奇数電極振動子を考案した。奇数電極振動子では、図6に示すように、電極印刷時の印刷開始部と終了部の寸法ずれの影響が少なくなるだけでなく、分極によって生ずる異方性により直交する振動モードの縮退が解け、振動モード軸が所定の方向に固定され、励振振動方向に対する二つの検出電極の対称性が改善されることを確認した。

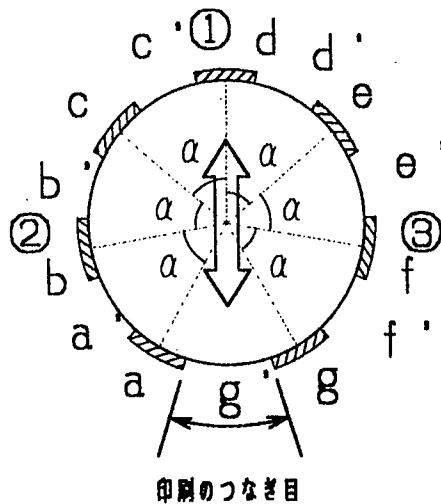


図6 7電極振動子の電極配置

第5章 圧電振動ジャイロの駆動・検出回路の設計と性能評価

本章では、まず圧電振動ジャイロの駆動・検出回路の構成と動作について述べ、圧電セラミック円柱振動子を用いた場合の駆動・検出回路の設計方針を明らかにした。また、温度による振動ジャ

イロの感度変化の主要因が材料のQの温度依存性にあることを明らかにするとともに、前述の等価回路解析を駆使して負荷抵抗値を最適に設定することにより、 -20°C でのQの値に対して $+60^{\circ}\text{C}$ で約 $1/4$ の値まで変化する材料を用いた場合に、図7に示すように、温度補償無しで、 25°C の感度に対して $\pm 20\%$ 以内の変化に押さえることができ、さらにサーミスタによる温度補償を行なうことにより、 $\pm 5\%$ 以内の変化を達成した。また、駆動・検出回路の専用IC化を行なうとともに、用途に合わせて、振動ジャイロの諸特性の評価を行い、従来の圧電振動ジャイロに比べて格段に小形で、応答性に優れた振動ジャイロを実現した。

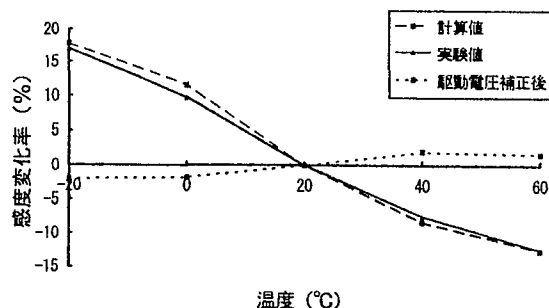


図7 感度の温度特性の補償結果

第6章 結 論

本章では、本論文を要約し、主要な結果を総括している。

審査結果の要旨

ビデオカメラの手ぶれ補正やカーナビゲーション用の角速度センサとして、コリオリ力を利用した圧電振動ジャイロが注目されている。しかし、金属角柱に圧電セラミック板を接着した従来の振動ジャイロは、小形化が困難で特性のばらつきが大きいなどの短所を有している。著者は、接着が不要で構造が単純な、圧電セラミック単体からなる新しい型の振動ジャイロを考案し、その等価回路を導出して解析・設計法を確立するとともに、共振周波数調整法やモード軸制御法などを開発し、小形で高性能な圧電振動ジャイロを実用化した。本論文はその成果をまとめたもので、全文6章よりなる。

第1章は緒論である。

第2章では、圧電セラミック円柱の直交する二つの屈曲振動を利用し、円柱外周面に形成した交差指電極により分極および駆動・検出を行う振動ジャイロを提案している。また、直径1mmの円柱にスクリーン印刷で交差指電極を形成する技術を確認し、振動子特性の分極条件依存性を明らかにするとともに、実用性に優れた振動子支持法を開発している。これらの技術は、素子の小形化につながる基礎技術として高く評価できる。

第3章では、振動モード軸と駆動・検出電極とのなす角度を考慮した等価回路を導出し、振動ジャイロの感度特性の解析を行っている。また、素子特性上問題となる振動モード軸のずれ角を、実測特性と等価回路による計算特性との比較により推定する方法を示している。

第4章では、静止時出力電圧のオフセットの原因となる振動モード軸のずれについて検討し、電極配置の非対称性がその主要因であることを明らかにしている。また、レーザにより溝を形成して振動モード軸を制御する方法を検討し、これを応用した共振周波数自動調整法を確認している。また、電極パターンによってもモード軸制御が可能なることを見出し、その有効性を検証している。この方法は、分極による異方性および圧電反作用を利用して直交モードの縮退を解きモード軸を固定するもので、静止時オフセット電圧の低減に顕著な効果を持つ優れた方法として高く評価できる。

第5章では、温度による感度の変化は主にQの温度依存性に起因していることを明らかにするとともに、この温度による変化は負荷抵抗値を最適に設定することによりほぼ補償できることを示している。また、駆動・検出回路の設計および専用IC化を行うとともに、振動ジャイロの諸特性の評価を行い、従来に比べて格段に小形で応答性に優れた圧電振動ジャイロが実現できることを示している。

第6章は結論である。

以上要するに本論文は、圧電セラミック円柱単体からなる新しい圧電振動ジャイロを提案し、製法ならびに等価回路による解析・設計法を確認し、小形で高性能な角速度センサを実用化したもので、電気通信工学ならびに超音波工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。